

木材構成則を導入した ASI-Gauss 法に基づく木造家屋倒壊解析技術
(その 2 : 木造家屋倒壊実験の再現解析)正会員 ○大村 浩之*¹ 同 磯部 大吾郎*³
同 伊藤 慎也*²木材はり 弾塑性・破壊解析 地震応答解析
ASI-Gauss 法 木造家屋

1. 序論

木造家屋の倒壊を含む非線形地震応答を解くためのシミュレーション手法として、T. Nakagawa and M. Ohta, 2003[1][2][3]の Extended Distinct Element Method (EDEM) をベースとした手法が良く知られている。EDEM では部材をバネ・ダッシュポットで接続された剛体球の集合で表現するため、部材の破壊に伴う不連続な変位場の扱いには適しているが、連続体理論の枠組みで部材の弾塑性挙動を扱うことができない。

そこで本研究では、骨組構造物の崩壊挙動を含む強非線形構造解析に有効な ASI-Gauss 法[4]にはり部材の木材構成則を導入することで、FEM をベースとした木造家屋倒壊解析技術を構築する。これにより、連続体としての木材の弾塑性変形から破壊までの過程と、破壊後の飛散といった離散物としての過程を統一的にシミュレートすることが可能となる。この提案手法を用い、2005 年に実大三次元振動破壊実験施設（以下、E-ディフェンス）で実施された既存木造家屋倒壊実験[3]の再現解析を行うことで、提案手法の妥当性と有用性を示す。

2. 木材の復元力特性モデル

本研究では、木材の復元力特性を図 1 に示すようにモデル化する。図中の弾塑性領域では、その 1 で述べた木材構成則モデルを用い、断面内の塑性（欠損）部分を同定し剛性を低下させる。その 1 では、応力が最大強度に達したら破壊状態と判定していたが、実際の架構は一定の耐力を保持するため、本稿では完全塑性領域、すなわち

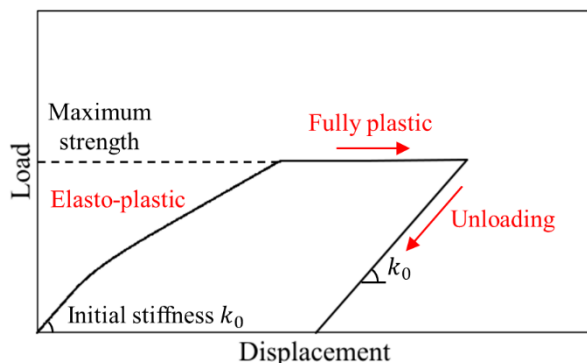


図 1 木材の復元力特性モデル

塑性流れ則に従うと仮定した。除荷時は常に初期剛性で挙動するものとする。この復元力特性モデルは一般的な Tri-linear モデルの第 2 直線領域を木材構成則に基づく非線形領域に置き換えたものといえる。

終局状態は要素の破断で表現するものとし、次式を用いて破断判定を行う。

$$\theta_{zx} \geq \theta_{zx}^c \vee \theta_{yz} \geq \theta_{yz}^c \vee \sigma \geq \sigma_t$$

ここで、 θ_{zx} , θ_{yz} はそれぞれ要素座標系 x, y 軸方向の変形角、 θ_{zx}^c , θ_{yz}^c は変形角の破断臨界値、 σ , σ_t はそれぞれ軸方向応力と引張強度である。終局変形に達した際の靱性破壊および引張強度に達した際の脆性破壊の 2 通りの破壊パターンを考慮する。

3. 移築した既存木造家屋の倒壊実験

2005 年に E-ディフェンスで実施された木造家屋倒壊実験[5]では、実際に建っていた既存不適格の木造家屋を震動台上に移築し、JR 鷹取波 100%による加振が実施された。実験では同等の仕様を持つ 2 棟の家屋を移築し、片方を無補強のまま、もう片方を耐震補強したうえで加振実験が実施されたが、本稿では無補強試験体のみを検討対象とする。

実験の過程で実測された対象家屋の重量は屋根 60.62 [kN], 2 階 133.90 [kN], 1 階 101.29 [kN], 総重量 295.82 [kN]であった。また、1 次固有周期は X (EW) 方向が 0.137 [s], Y (NS) 方向が 0.222 [s]であった。

4. 木造家屋倒壊実験の再現解析

4.1 解析モデル

木造家屋の解析モデルは全ての部材を 2 要素分割のはり要素で作成する。本研究では簡単のため壁材と柱を一体の構造要素としてモデル化し、構造要素試験で得られた荷重変位関係と一致するように断面二次モーメントと塑性断面係数をキャリブレーションした。1 階および 2 階の梁および屋根に該当する要素の密度は、解析モデルの重量が第 2 節で述べた重量の実測値と一致するように決定している。弾性自由振動解析で算出された解析モデルの 1 次固有周期は X (EW) 方向が 0.347 [s], Y (NS) 方向が 0.523 [s]である。X, Y 方向ともに実測値に対して値が大きいのは、外壁および内壁の初期剛性を過小評価してい

表 1 木材の材料パラメータ

	Hinoki	Larch	Western hemlock
Young's modulus [GPa]	8.8	9.8	10.3
Poisson's ratio	0.4	0.4	0.4
Compressive strength [MPa]	39.0	44.0	40.0
Tensile strength [MPa]	117.0	132.0	120.0
Maximum strength [MPa]	85.0	85.0	85.0
Ultimate deformation angle [rad]	0.16	0.16	0.16
Density [kg/m^3]	440	500	480

るためと考えられるが、地震動下では早期に剛性低下が生じるため、倒壊挙動への影響は少ない。

要素の材料定数を表 1 に示す。断面寸法は柱が 10×10 [cm]、梁が 10×15 [cm]もしくは 10×20 [cm]、筋交いが 3×9 [cm]、その他の部材は全て 10×15 [cm]である。

4.2 解析条件

時間増分は 0.001 [s]、Newmark β 法におけるパラメータは $\beta = 4/9$ 、 $\gamma = 5/6$ とする。物理減衰は導入していない。接触は部材と床面の間のみ考慮する。解析の入力波形には JR 鷹取波 100%加振時に震動台上で実測された加速度時刻歴を用いる。

4.3 解析結果

図 2 に再現解析の可視化結果および実験映像を示す。コンターは圧縮強度で正規化した最大圧縮応力を表している。また、破断し耐力が喪失した要素は可視化していない。図から、4.4 [s]で家屋が Y 軸負方向へ大きく傾き、6.0 [s]には 1 階の部分的な損傷が生じ、7.6 [s]の段階には 1 階の層崩壊が完了している。実験結果と比較すると、層崩壊が生じ始めるまでの過程は概ね一致しているが、実験では層崩壊の進行速度が解析よりも遅い。これは、耐力を失った部材が 2 階部分に対して緩衝材のような効果を発揮しているためと考えられる。

1 階における Y 軸方向の層間変位時刻歴を図 3 に示す。グラフより、倒壊挙動の定性的な傾向が実験結果と対応していることが確認できる。応答フーリエスペクトルや履歴曲線など、結果のより詳細な分析は口頭発表にて述べる。

5. 結論

本研究では、その 1 で述べた木材構成則を導入した ASI-Gauss 法に基づく木造家屋倒壊シミュレーション技術を開発し、E-ディフェンスで実施された既存木造家屋倒壊実験の再現解析を実施した。解析結果から、復元力特性におけるスリップ挙動を再現できていないなどの課題は

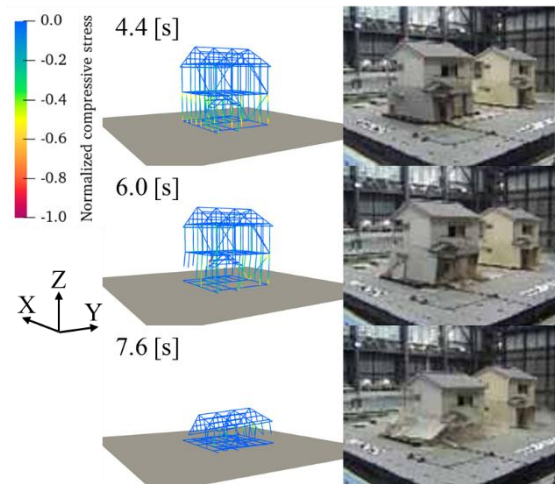


図 2 解析の可視化結果（左）と実験映像（右）

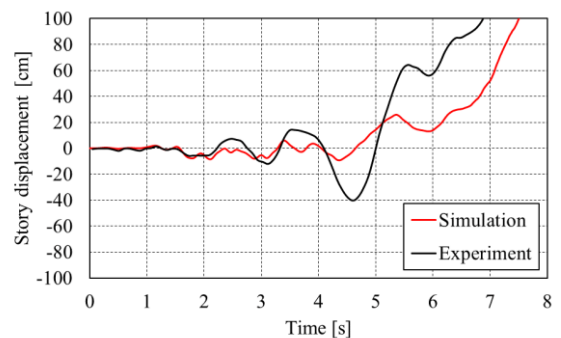


図 3 1 階における Y 軸方向の層間変位時刻歴

散見されたが、提案手法によって木造家屋の地震時倒壊挙動を妥当にシミュレートできることが確認された。

参考文献

- [1] T. Nakagawa and M. Ohta, Collapsing process simulations of timber structures under dynamic loading I: simulations of two-story frame models. *J. Wood Sci.* **49**, 392–397, 2003.
- [2] T. Nakagawa and M. Ohta, Collapsing process simulations of timber structures under dynamic loading II: simplification and quantification of the calculating method. *J. Wood Sci.* **49**, 499–504, 2003.
- [3] T. Nakagawa, M. Ohta, T. Tsuchimoto and N. Kawai, Collapsing process simulations of timber structures under dynamic loading III: numerical simulations of real-size wooden houses. *J. Wood Sci.* **56**, 284–292, 2010.
- [4] K. M. Lynn and D. Isobe, Finite element code for impact collapse problems of framed structures. *Int. J. Numer. Methods Eng.* **69**, 2538–2563, 2007.
- [5] 槌本敬大, 移築した既存木造住宅の耐震補強・無補強実験. *建築技術* **675**, 158–161, 2006.

*1 防災科学技術研究所

*2 筑波大学大学院

*3 筑波大学

*1 National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

*2 Graduate school, University of Tsukuba

*3 University of Tsukuba